

**ДИАГНОСТИКА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ  
В РОТОРНОЙ СИСТЕМЕ СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

**Захезин Альберт Михайлович,**  
канд. техн. наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет»,  
г. Челябинск, E-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)

**Колосова Ольга Петровна,**  
канд. техн. наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет»,  
г. Челябинск, E-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)

**Иванов Дмитрий Юрьевич,**  
канд. техн. наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет»,  
г. Челябинск, E-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)

**Пакулев Михаил Валерьевич,**  
генеральный директор ООО Инженерный Центр Диагностики и контроля  
«СоюзТехГаз», г. Челябинск, E-mail: [argongaz@gmail.com](mailto:argongaz@gmail.com)

**Перкина Анастасия Александровна,**  
эксперт ООО Инженерный Центр Диагностики и контроля «СоюзТехГаз»,  
г. Челябинск, E-mail: [argongaz@gmail.com](mailto:argongaz@gmail.com)

**Рыбин Владимир Александрович,**  
ведущий эксперт ООО Инженерный Центр Диагностики и контроля «СоюзТехГаз»,  
г. Челябинск, E-mail: [argongaz@gmail.com](mailto:argongaz@gmail.com)

***Ключевые слова:** Фурье-анализ, частотный анализ, вейвлет-анализ, коэффициент демпфирования, промышленная безопасность.*

***Аннотация.** В статье рассматривается метод неразрушающего контроля состояния конструкции механической системы в нормальных режимах работы и обнаружения дефектов с использованием Фурье-и вейвлет-анализа вибрационного сигнала.*

**STATISTICAL METHODS DIAGNOSTICS OF FATIGUE CRACKS  
IN THE ROTOR SYSTEM**

**Zakhezin Albert Mikhailovich,**  
Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor  
South Ural state University, Chelyabinsk, E-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)

**Kolosova Olga Petrovna,**  
Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor  
South Ural state University, Chelyabinsk, E-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)

**Ivanov Dmitry Yurievich,**  
Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor  
South Ural state University, Chelyabinsk, E-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)

**Pakulev Mikhail Valeryevich,**  
CEO, LLC Engineering Center of Diagnosis and control "SoyuzTehGaz",  
Chelyabinsk, E-mail: [argongaz@gmail.com](mailto:argongaz@gmail.com)

**Perkina Anastasia Alexandrovna,**  
The expert, LLC Engineering center of Diagnostics and control "SoyuzTehGaz",  
Chelyabinsk, E-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)

**Rybin Vladimir Alexandrovich,**  
A lead expert, LLC Engineering Center for Diagnostics and control "SoyuzTehGaz",  
Chelyabinsk, E-mail: [info@susu.ru](mailto:info@susu.ru)

**Key words:** *Fourier analysis, frequency analysis, wavelet analysis, damping factor, industrial security.*

**Abstract.** *The article considers the method of non-destructive testing for structural condition monitoring of a mechanical system in normal operating modes and detection of defects with use of Fourier and wavelet analysis of vibration signal.*

Разрушение элементов конструкций при переменных нагрузках происходит обычно постепенно, вследствие накопления микрповреждений, переходящих в развивающиеся усталостные трещины. Появление в элементах конструкции усталостных трещин еще не означает окончательного выхода этих элементов из строя и необходимости немедленного проведения ремонтных работ. На практике элементы конструкции с трещинами могут продолжать надежно функционировать еще значительное время, а небольшое снижение эксплуатационных нагрузок может повысить их долговечность и даже полностью приостановить рост трещин. Поэтому при вибрационной диагностике роторных машин необходимо определять не только наличие и глубину трещины, но и ее местоположение, так как скорость роста трещин зависит от уровня возникающих напряжений и от длины имеющейся на данный момент трещины.

Для диагностики усталостных трещин в роторных системах было изготовлено десять образцов вала лабораторной установки. В месте концентрации напряжений (галтель возле подшипника) была искусственно выращена трещина различной глубины на стенде, моделирующем циклические нагрузки при консольном изгибе. Схема установки приведена на (рис.1). Вал винтами закреплялся тонким концом в специальном приспособлении и устанавливался на стол вибростенда. На толстый конец вешался груз, который фиксировался контргайкой (рис.2).

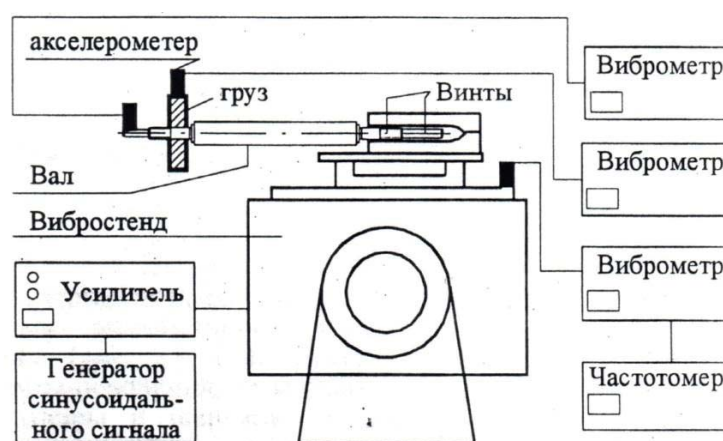


Рис. 1. Стенд для выращивания усталостной трещины

При испытаниях, с помощью генератора синусоидального сигнала, сначала входное воздействие задавалось вблизи третьей резонансной частоты системы, затем по достижении определенного количества циклов нагружения фиксировалось появление трещины по увеличению амплитуды виброускорения.

После этого частоту синусоидального сигнала изменяли на частоту находящуюся в окрестностях третьей резонансной частоты системы. Для невидимых, зарождающихся трещин переход на вторую стадию нагружения в окрестностях резонансной частоты не производился.



Рис. 2. Местоположение усталостной трещины

Использование двух режимов нагружения при наращивании трещины смогло приблизить процесс развития и роста трещины к условиям усталостного развития трещин в валах при нестационарных нагружениях. В процессе наращивания трещины определялось количество циклов нагружения, амплитуда прогиба конца вала и амплитуда ускорения груза в начале и в конце испытаний.

Экспериментальные исследования были проведены на специально разработанной и изготовленной лабораторной установке (рис. 3).

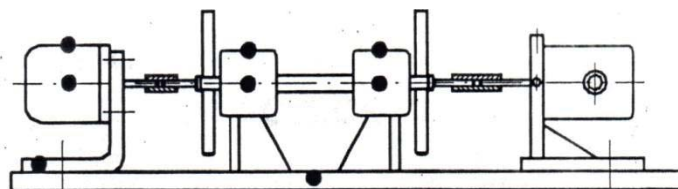


Рис. 3. Экспериментальная установка

Конструктивно установка состоит из платформы-основания, на которой крепятся электродвигатель и две опоры с шариковыми радиальными однорядными подшипниками. В опорах на подшипниках качения вращается вал с двумя дисками. Вал соединен с электродвигателем с помощью муфты. Экспериментальное исследование вибраций заключалось в измерении виброускорений в вертикальном и горизонтальном направлениях на корпусах подшипников для десяти случаев технического состояния вал без трещины и вал с трещиной различной глубины при прочих равных условиях.

Расчетное исследование динамики роторной системы заключалось в создании конечно-элементной модели, теоретического модального анализа, и динамического исследования изменения модальных вкладов в роторной системе.

Расчет конечно-элементной модели был выполнен с использованием пакета прикладных программ STARDYNE. Математическая модель роторной системы, поддерживаемая подшипниками качения, состоит из 441 узлов (482 в системе с трещиной) и 200 (208) конечных элементов в виде пространственных призм (рис. 4).

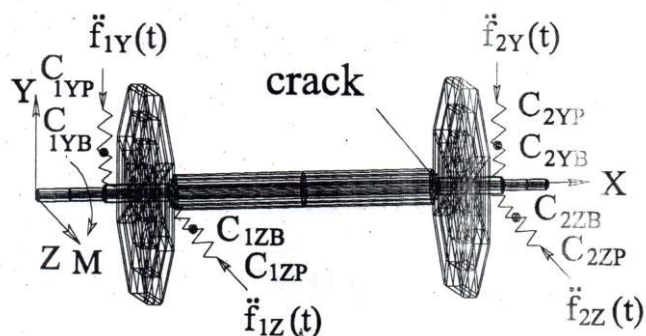


Рис. 4. Конечно-элементная модель

Вычислительная процедура состояла из нескольких этапов: формирование матриц жесткости для каждого конечного элемента; статический анализ; вычисление собственных частот и собственных форм конструкции; динамический анализ. В качестве входных воздействий при динамическом расчете в конечно-элементной модели использовались измеренные значения виброускорений подшипниковых узлов в вертикальном и горизонтальном направлениях. Для различных конечно-элементных моделей (без трещины и с трещиной 7%) были получены собственные значения для 1161 степени свободы системы, и построены собственные формы для первых 600 мод (в диапазоне до 1200 Гц).

При анализе мод колебаний сложная динамическая деформация, совершающей механические колебания конструкции, разлагается в набор простых мод с индивидуальными частотными параметрами и параметрами затухания. Поэтому появление и развитие трещины будет изменять сложную динамическую деформацию системы, представляющей собой взвешенную сумму всех мод ее колебаний, и, следовательно, изменять собственную частоту и форму моды. Таким образом, увеличение амплитуды вибросигнала в определенном частотном диапазоне будет связано с изменением модального вклада для собственной частоты, соответствующей этому частотному диапазону.

После проведения конечно-элементного анализа был выявлен частотный диапазон 650-1150 Гц, в котором произошло наиболее сильное изменение модальных вкладов роторной системы при появлении усталостной трещины на валу. Статистический анализ вибросигнала заключался в определении пик-фактора, эксцесса и безразмерных амплитудных дискриминантов высоких четных порядков. Значения пик-фактора, коэффициента эксцесса и безразмерных амплитудных дискриминантов высоких четных порядков, вычисленных в диапазоне 650-1150 Гц, для систем с различной глубиной трещины приведено в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что при достижении трещины глубины 5-8% и особенно 25%, значения пик-фактора, коэффициента эксцесса и амплитудных дискриминантов значительно увеличиваются как для широкополосного сигнала вибрускорения, так и для сигнала выделенного в диапазоне 650-1150 Гц. При появлении трещины 2-3% это увеличение совсем не заметно для широкополосного сигнала, но значения всех коэффициентов увеличиваются для узкополосного сигнала.

Неопределенность многих параметров расчетной модели носит некоторую погрешность при определении мод колебаний. Для того, чтобы контролировать техническое состояние и зарождающиеся дефекты ротора в эксплуатационных режимах работы, проводим спектральный анализ вибросигнала.

Применение того или иного метода обработки вибросигнала подсказывает его характер. Так, если мы имеем стационарный сигнал, то можно ограничиться обработкой во временной области с определением основных гармоник.

Значения пик-фактора, коэффициента эксцесса и безразмерных амплитудных дискриминантов

Величина трещины, в % от площади сечения	Правый подшипник, вертикальное направление	
	Диапазон 2-6535 Гц	Диапазон 650-1150 Гц
Пик-фактор		
0%	2,34	1,65
2-3%	1,801	5,81
5-8%	2,58	8,53
25%	15,34	38,70
Эксцесс		
0%	5,16	1,67
2-3%	3,87	7,07
5-8%	2,09	14,73
25%	46,83	134,48
Значения $A_8$		
0%	0,0447	0,1886
2-3%	0,188	4,261
5-8%	0,785	14,03
25%	874	908

Влияние на вибрационный сигнал большого количества возмущающих факторов требует для его обработки применения спектрального Фурье-анализа. При анализе взаимосвязанных сигналов нужно определить фазовые отношения между несколькими спектрами.

Разного рода местные повреждения, снижение жесткости, образование трещин, увеличение демпфирования, изменение массово-геометрических параметров системы, как во времени так и в пространстве, приводит к нестационарности вибрационного сигнала. С анализом такого рода сигналов хорошо справляется Вейвлет-анализ.

Для установления информативных характеристик аномальных измерений вибросигнала во времени в высокочастотной области применим вейвлет-базис в виде кусочно-непрерывной функции либо вейвлет с большей центральной частотой. В качестве первого приближения воспользуемся для базисной функции вейвлетом Морле, данная функция дает минимальное расхождение с Фурье-анализом вибрационного сигнала. Вейвлет Морле обладает частотной локализацией, лучшей среди других базисов, поэтому рекомендуется для решения задачи представления сигнала в широком диапазоне частот [5-7].

Экспериментальные измерения параметров вибрации проводились с помощью аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер», аксельрометра 4370, предусилителей 2635. Оцифровку и обработку сигналов измерения выполняли с помощью многоканального синхронного регистратора и спектроанализатора «Атлант» [4], включенного в Государственный реестр средств измерения под № 19989-00. Предварительный анализ результатов Фурье-преобразования позволяет обоснованно выбрать длину реализации вибросигнала, ширину полосы частот, вид вейвлета и центральную частоту Вейвлет-преобразования.

На рис.5 показаны результаты Вейвлет-анализа этих сигналов, где видно, что основные гармоники остаются устойчивыми на протяжении всего временного промежутка. В то время, как выявленные гармоники высоких частот, определяющие зарождающуюся трещину со временем затухают (рис.5). Таким образом, Фурье- и Вейвлет-анализ дополняют друг друга. Первый обнаруживает в анализируемом вибросигнале гармонические компоненты, второй позволяет локализовать гармоники во времени.



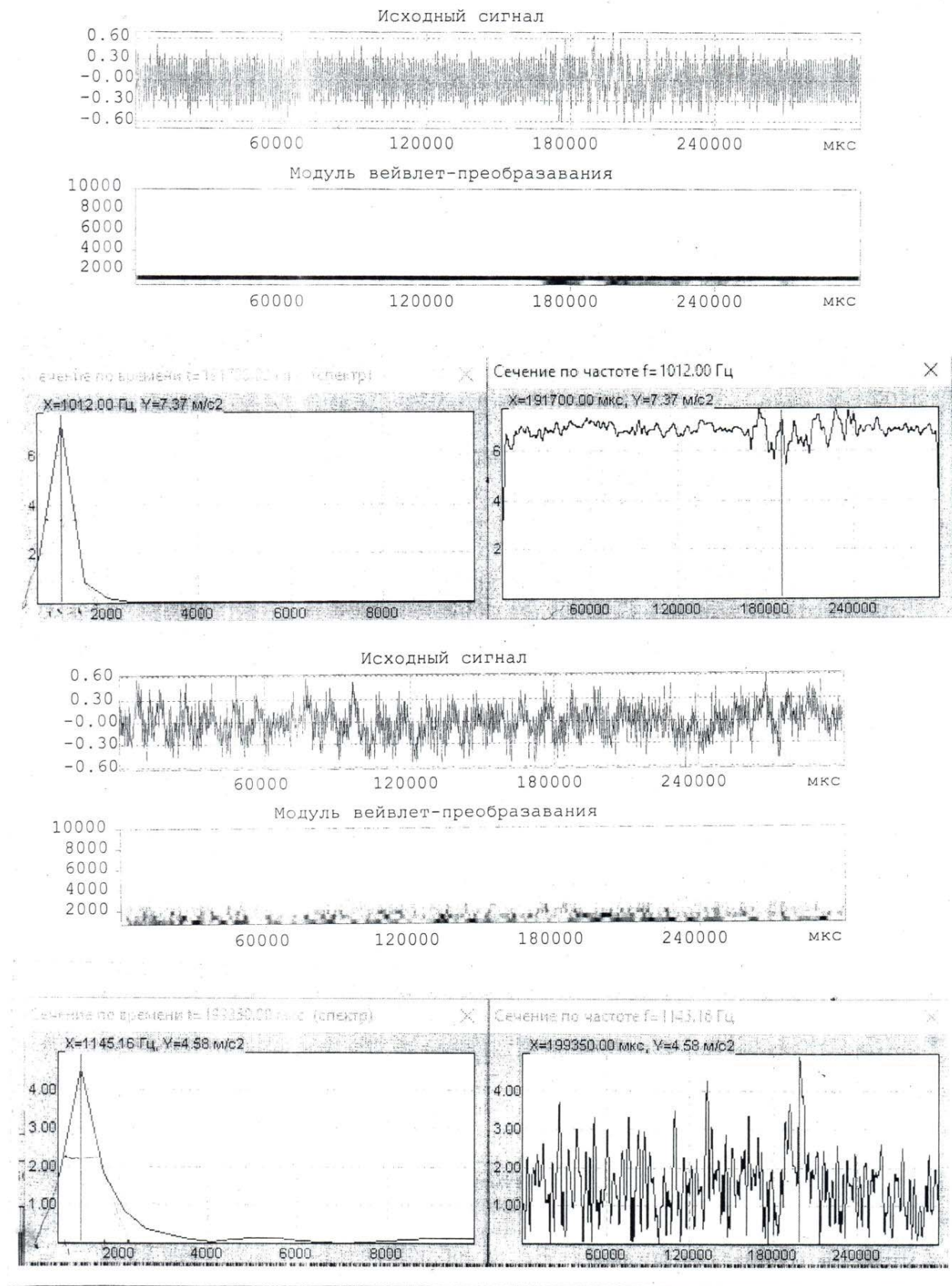


Рис.5. Результаты Вейвлет-анализа дефектного ротора с трещиной а) 5%, в) 25%

Таким образом, пик-фактор, коэффициента эксцесса, значения безразмерных амплитудных дискриминантов плохо отражает появление небольшой трещины в роторной системе для широкополосного сигнала виброускорения, но подходит в качестве информативной характеристики для узкополосного сигнала выделенного в диапазоне 650-1150 Гц - диапазона с наибольшим изменением модальных вкладов в системе с появлением трещины.

С помощью Фурье- и Вейвлет-анализа можно распознать признаки аномального проявления изменения дефектного состояния ротора по коэффициенту демпфирования [5,6], так как с развитием трещины коэффициент демпфирования изменяется на этой частоте.

## Список литературы

1. Захезин А.М., Малышева Т.В., Колосова О.П. Определение глубины и местоположения трещины в системе ротор-вал на подшипниках скольжения с помощью модального анализа. Сборник докладов и материалов IV международной научно-технической конференции "Вибрационные машины и технологии". Курск: КурскийГТУ, 1999.-С. 186-189.
2. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. М.: ДМК Пресс, 2008. – 448 с.
3. Захезин А.М. Метод неразрушающего контроля для определения зарождающихся дефектов при помощи Фурье и Вейвлет-анализа вибрационного сигнала. Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 28-33.
4. Многоканальный синхронный регистратор спектроанализатор «Атлант». Руководство пользователя. Пермь. 1997.-С. 139.
5. Захезин, А.М. Мониторинг и прогнозирование несущей способности здания в эксплуатационных режимах его работы. Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тез. докл. IV Междунар. симпозиума. - Челябинск, 2012.
6. Zakhezin A. M., Prydco I.G. Vibration Diagnostics of Gas Pipelines Technological Equipment Using Wavelet Analysis. Procedia Engineering. 2016.
7. Захезин А.М., Малышева Т.В. Экспериментальный и теоретический модальный анализ конструкций с усталостными трещинами. Проблемы машиностроения и надежности машин № 5, 2010. – С. 89-96.

---

УДК 676.5+ 676.026.3

## ИЗ ПРАКТИКИ АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУШИЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН

**Куцубина Нелли Валерьевна,**

канд. техн. наук, доцент,

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,

г. Екатеринбург, E-mail: [Nelly3416@mail.ru](mailto:Nelly3416@mail.ru)

**Васильев Вадим Владимирович,**

старший преподаватель,

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,

г. Екатеринбург, E-mail: [Vadim@yandex.ru](mailto:Vadim@yandex.ru)

**Ключевые слова:** бумагоделательные машины, сушильная часть, анализ технического состояния, вибрация, обрывность бумажного полотна.

**Аннотация.** В докладе обсуждаются причины возникновения колебаний конструкций сушильных частей специфического для сушильных частей характера, выявленных при анализе технического состояния ряда БМ предприятий ЦБП.